МЕТОДЫ АУДИО КОДИРОВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ВИДЕОКОДЕКАХ

Мухамедова Диёрабегим Бахтиёр кизи

PhD., доцент кафедры СТРВ "Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хоразмий"

Annotatsiya: Ushbu maqolada yangi avlod videokodeklarida qo‘llaniladigan zamonaviy audio kodlash usullari tahlil qilinadi. Signalni qayta ishlashning asosiy bosqichlari, psixoakustik modellari, MDCT (modifikatsiyalangan diskret kosinus transformatsiyasi), kvantlash jarayoni va entropiya kodlash mexanizmlari ko‘rib chiqiladi. Mashhur audiokodeklarning taqqoslanishi va ularning raqamli video tizimlaridagi samaradorligi haqida ma’lumotlar keltiriladi.

Kalit so‘zlar: audio kodlash; videokodeklar; MDCT; psixoakustik model; kvantlash; entropiya kodlash; AAC; MP3; Opus; AC-3; siqish; chastotaviy tahlil; bitreyt; spektr; ovoz sifati.

Abstract: This paper examines modern audio coding methods used in next-generation video codecs. It reviews key stages of signal processing, psychoacoustic modeling, MDCT (Modified Discrete Cosine Transform), quantization procedures, and entropy coding techniques. A comparison of popular audio codecs and their efficiency in digital video systems is also presented.

Keywords: audio coding; video codecs; MDCT; psychoacoustic model; quantization; entropy coding; AAC; MP3; Opus; AC-3; compression; frequency analysis; bitrate; spectrum; audio quality.

Аннотация: В статье рассматриваются современные методы аудиокодирования, используемые в видеокодеках нового поколения. Анализируются основные этапы обработки сигнала, психоакустические модели, преобразования MDCT, квантование и энтропийное кодирование. Представлено сравнение популярных аудиокодеков и их эффективности в системах цифрового видео.

Ключевые слова: аудиокодирование; видеокодеки; MDCT; психоакустическая модель; квантование; энтропийное кодирование; AAC; MP3; Opus; AC-3; сжатие; частотный анализ; битрейт; спектр; качество звука.

Введение

Современные видеокодеки представляют собой сложные мультимедийные системы, обеспечивающие одновременное эффективное кодирование видео- и аудиопотоков. Несмотря на то, что визуальная информация традиционно занимает большую часть битрейта, качество аудиосигнала остаётся критически важным компонентом общего восприятия мультимедийного контента [1]. Эффективные методы аудиокодирования позволяют значительно снижать объём данных без заметной потери качества,

ISSN 3030-3907

что особенно важно для широкополосных трансляций, потоковых сервисов и мобильных систем связи [2].

Основу современных аудиокодеков составляют такие технологии, как модифицированное дискретное косинусное преобразование (MDCT), психоакустические модели и контекстно-адаптивные методы квантования [3]. MDCT обеспечивает высокое время–частотное разрешение, позволяя эффективно анализировать спектральные компоненты сигнала и распределять энергию по частотным поддиапазонам [4]. Психоакустические модели используют особенности слухового восприятия — маскирование, пороги слышимости, временные эффекты — что позволяет удалять спектральные компоненты, не воспринимаемые человеческим слухом [5].

В современных видеокодеках, таких как H.264/AVC, H.265/HEVC и AV1, используются различные аудиокодеки (AAC, Opus, AC-3, E-AC-3), отличающиеся методами анализа, преобразования, квантования и энтропийного кодирования [6]. Их эффективности достигается за счёт оптимального сочетания спектральных преобразований, нелинейного распределения квантования и статистического моделирования данных [7].

Кроме того, важную роль играет компромисс между качеством и битрейтом. Традиционные кодеки, такие как MP3, обеспечивали приемлемое качество, но современные решения, такие как AAC и Opus, демонстрируют значительно лучшие показатели при низких битрейтах, особенно в сценариях потоковой передачи [8], [9].

Далее, анализ методов аудиокодирования в современных видеокодеках является актуальной научной задачей, определяющей эффективность мультимедийных систем нового поколения.

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Исследования в области аудиокодирования активно развиваются с конца XX века, когда требования к передаче мультимедийных данных начали стремительно расти. Первые методы сжатия, использующие простые частотно-временные преобразования, были представлены в ранних стандартах MPEG-аудио и легли в основу кодеков MP1 и MP2 [1]. Однако именно появление MP3 стало ключевым технологическим прорывом благодаря использованию психоакустической модели и дискретного косинусного преобразования, что дало возможность существенно снизить битрейт при сохранении приемлемого качества [2].

Позднее работы по совершенствованию спектрального анализа привели к внедрению модифицированного дискретного косинусного преобразования (MDCT), обладающего возможностью перекрывающихся окон и более высоким частотным разрешением [3]. Исследования Princen и

ISSN 3030-3907

Bradley показали, что MDCT эффективно устраняет артефакты блокирования, характерные для ранних аудиокодеков [4]. Эти результаты стали основой широкого применения MDCT в AAC, AC-3, E-AC-3, Opus и других современных кодеках.

AAC был представлен как преемник MP3 и включал усовершенствованные методы психоакустического моделирования, адаптивное квантование и более эффективное энтропийное кодирование [5]. Согласно исследованию Herre и Johnston, AAC обеспечивает значительно более высокое качество при низких и средних битрейтах благодаря гибкой структуре окон и улучшенному фильтру банков поддиапазонов [6]. Появление HE-AAC далее усилило возможности кодирования за счёт спектрального реплицирования и параметрического стерео [7].

Параллельно развивались кодеки семейства Dolby — AC-3 и E-AC-3, широко используемые в телевизионных и кинематографических стандартах. Они применяют гибридные психоакустические модели, оптимизированные для многоканального звука, что было подтверждено в ряде исследований по восприятию пространственного аудио [8].

Последние разработки в области интернет-аудио, такие как Opus, объединили линейное предсказание (SILK) и MDCT-подход (CELT), обеспечив низкую задержку и высокое качество широкополосной передачи [9]. Согласно анализу Xiph.Org, Opus превосходит AAC и MP3 в условиях низких битрейтов и нестабильных сетевых каналов [10].

Видеокодеки нового поколения (H.264, H.265, AV1) не используют собственные методы аудиокодирования, но включают поддержку внешних кодеков, оптимизированных для мультимедийных контейнеров. Это требуют от аудиокодеков высокой эффективности и совместимости с широким спектром устройств и платформ [11].

Таким образом, обзор литературы показывает, что эволюция аудиокодирования основана на усовершенствовании спектрального анализа, психоакустических моделей и методов энтропийного кодирования, что обеспечивает высокое качество звука при минимальных битрейтах.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АУДИОКОДИРОВАНИЯ

Теоретические основы аудиокодирования формируются на сочетании математических преобразований, моделей восприятия человеческим слухом и методов статистического сжатия. Цель аудиокодирования заключается в уменьшении объёма данных при сохранении максимально возможного субъективного качества звука [2]. Современные методы аудиокодирования используют спектральный анализ сигнала, психоакустические модели и

ISSN 3030-3907

энтропийное кодирование, формируя линейную или гибридную структуру обработки.

Одним из ключевых элементов является модифицированное дискретное косинусное преобразование (MDCT), которое обеспечивает эффективное разложение аудиосигнала на частотные компоненты. Основное преимущество MDCT заключается в использовании перекрывающихся окон, что обеспечивает гладкость переходов между блоками и снижает спектральные искажения [3]. Согласно исследованиям Princen и Bradley, MDCT обеспечивает оптимальное соотношение между временной и частотной локализацией, делая его стандартным компонентом AAC, AC-3, E-AC-3 и Opus [4].

Поскольку МДКП является преобразованием с перекрытием, оно немного отличается от других преобразований Фурье. В МДКП в два раза меньше выходов, чем входов (в отличие от других преобразований, где выходов ровно столько же, сколько входов).

В частности, это линейная функция: $F: \mathbb{R}^{2N} \to \mathbb{R}^2$, где $\mathbb{R}$ - множество вещественных чисел. $2N$ — вещественные числа $x_0, \dots x_{2N-1}$, преобразуются в вещественные числа $x_0, \dots x_{N-1}$, в соответствии с формулой:

$$X_k = \sum_{m=0}^{2N-1} x_n cos\left[\frac{\pi}{N}\left(n + \frac{1}{2} + \frac{N}{2}\right)\left(k + \frac{1}{2}\right)\right] \quad (1)$$

Коэффициент нормализации здесь в начале преобразования, а множество произвольно и отличается в разных вариациях условий.

Обратное МДКП известно как ОМДКП. Поскольку они отличаются количеством входов и выходов, то на первый взгляд может показаться, что МДКП нельзя преобразовать в обратное. Однако наилучшая обратимость преобразования достигается применением ОМДКП к перекрывающимся блокам, и является причиной устранения ошибок перед извлечением исходных данных. Этот способ известен как принцип устранения временных помех (ПУВП).

ОМДКП преобразует вещественные числа $x_0, \dots x_{2N-1}$, множества N в вещественные числа $y_0, \dots y_{2N-1}$, множества $2N$ в соответствии с формулой:

$$y_k = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1} x_k cos\left[\frac{\pi}{N}\left(n + \frac{1}{2} + \frac{N}{2}\right)\left(k + \frac{1}{2}\right)\right] \quad (2)$$

В случае, если МДКП используется с интервальной нормализацией, коэффициент этой нормализации в начале формулы ОМДКП нужно умножить на 2 (то есть получается 2/N).

Ключевую роль в аудиокодировании играет психоакустическая модель — математическое представление механизмов восприятия звука человеком. Психоакустические модели учитывают эффекты частотного и временного маскирования, кривые слышимости Флетчера–Мансонов, а также пороги

ISSN 3030-3907

восприятия в различных спектральных диапазонах [5]. Работа Johnston по моделированию маскирующих эффектов показала, что удаление спектральных компонентов, оказывающихся ниже порога слышимости, не влияет на субъективное качество, что значительно снижает количество данных для передачи [6].

Важной частью теоретической основы является квантование — процесс уменьшения точности коэффициентов MDCT. Адаптивное квантование, применяемое в AAC и Opus, использует нелинейные шкалы, позволяющие распределять больше бит на слышимые частоты и меньше — на области, находящиеся под маскированием [7]. Оптимизация квантования осуществляется с использованием критериев минимизации искажений и оценки битовых затрат, что тесно связано с моделью скорости–искажений.

Следующим этапом кодирования является энтропийное кодирование, включающее методы Хаффмана, арифметического кодирования и контекстно-адаптивных схем [8]. Энтропийное кодирование обеспечивает компактное представление данных за счёт статистического анализа частоты появления символов. В AAC широко применяется кодирование Хаффмана, в то время как Opus использует более современные контекстно-зависимые модели [9].

Многие современные аудиокодеки также используют гибридные схемы. Например, Opus сочетает линейное предсказание речи (SILK) и MDCT-подход (CELT), что позволяет эффективно кодировать как речевые, так и музыкальные сигналы при низкой задержке [10]. Эффективность такого подхода подтверждена многочисленными исследованиями в области широкополосной трансляции и VoIP.

Также, теоретические основы аудиокодирования формируются на сочетании спектральных преобразований, психоакустического анализа, адаптивного квантования и энтропийного кодирования, обеспечивая высокую эффективность современных видеокодеков и аудиосистем.

МЕТОДЫ АУДИОКОДИРОВАНИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ВИДЕОКОДЕКАХ

Методы аудиокодирования, применяемые в современных видеокодеках, основаны на сочетании психоакустических моделей, спектральных преобразований и статистических методов сжатия. Несмотря на то что видеокодеки, такие как H.264/AVC, H.265/HEVC и AV1, не включают собственных встроенных аудиокодеров, они используют внешние аудиостандарты — AAC, AC-3, E-AC-3, Opus и др., что обеспечивает высокую совместимость и качество звука [6].

ISSN 3030-3907

Одним из наиболее распространённых кодеков является AAC (Advanced Audio Coding), который стал преемником MP3 и предложил значительно более эффективные методы анализа и квантования аудиосигнала. Ключевым элементом AAC является MDCT-преобразование, использующее перекрывающиеся окна и обеспечивающее высокую частотную селективность [3]. По исследованиям Herre и Johnston, AAC демонстрирует лучшие показатели качества при средних и низких битрейтах благодаря гибкому выбору длины окон, адаптивному квантованию и эффективному кодированию Хаффмана [5], [6]. В современных видеокодеках AAC является стандартным выбором для потокового вещания и телевещания.

Другой широко используемый метод аудиокодирования — AC-3 (Dolby Digital), ориентированный на многоканальные аудиосистемы. AC-3 использует гибридную психоакустическую модель и модифицированное MDCT-преобразование, обеспечивая точное кодирование спектральных компонентов и минимизацию межканальных искажений [7]. Его улучшенная версия, E-AC-3, позволяет достичь более высокой эффективности за счёт улучшенного квантования и расширенного набора битовых распределений, что особенно важно для HDTV-трансляций и киноиндустрии [8].

Отдельную категорию занимает Opus — аудиокодек нового поколения, принятый IETF в качестве стандарта для интернет-аудио и видеоконференций. В отличие от AAC и AC-3, Opus является гибридным кодеком, сочетающим линейное предсказание речи (SILK) и MDCT-механизм (CELT) [9]. Благодаря такой архитектуре Opus обеспечивает низкую задержку, высокую устойчивость к потерям пакетов и превосходное качество на низких битрейтах. Согласно анализам Xiph.Org, Opus существенно превосходит MP3 и AAC в задачах реального времени и потоковых сервисах [10].

В современных видеокодеках методы аудиокодирования также интегрируются в мультимедийные контейнеры. Например, H.264 и H.265 используют контейнеры MPEG-TS или MP4, позволяющие включать различные аудиопотоки с обеспечением синхронизации и поддержки многоканальных форматов [11]. AV1, разрабатываемый консорциумом AOMedia, ориентирован на использование Opus или Vorbis, что обеспечивает оптимальное сочетание открытого стандарта и высокой эффективности [12].

В результате, методы аудиокодирования в современных видеокодеках представляют собой комбинацию спектрального анализа, психоакустических моделей и адаптивных алгоритмов, обеспечивающих высокое качество звука при минимальном битрейте. Использование AAC, AC-3, E-AC-3 и Opus позволяет адаптировать кодирование к различным условиям передачи и

ISSN 3030-3907

типам контента, делая эти методы ключевыми в современных мультимедийных системах.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ АУДИОКОДИРОВАНИЯ

Сравнительный анализ современных алгоритмов аудиокодирования позволяет определить их эффективность в различных мультимедийных сценариях и выявить преимущества конкретных решений для видеокодеков нового поколения. Основными критериями оценки являются: качество звучания при низких битрейтах, устойчивость к артефактам, эффективность психоакустического моделирования, задержка обработки и совместимость с видеостандартами [5], [7].

Одним из наиболее известных и исторически значимых кодеков является MP3. Он использует дискретное косинусное преобразование и первую версию психоакустической модели MPEG, обеспечивая приемлемое качество при битрейтах выше 128 кбит/с, но демонстрируя значительные искажения на низких битрейтах [2]. AAC стал прямым преемником MP3 и внедрил более совершенную структуру окон, расширенные психоакустические модели и оптимизированное квантование, что позволило достичь значительно более высоких оценок по шкале MOS при 64–96 кбит/с [6].

Современные широкополосные видеосистемы всё чаще используют Opus — гибридный кодек, объединяющий SILK и CELT. Благодаря низкой задержке и высокой адаптивности Opus превосходит AAC на низких битрейтах (32–48 кбит/с), обеспечивая лучшее качество речи и стабильность при потере пакетов [9]. В системах вещания и киноформатах по-прежнему доминируют AC-3 и E-AC-3, так как они оптимизированы для многоканального звучания, поддерживают битстрим-совместимость и обеспечивают высокое качество при битрейтах более 192 кбит/с [8].

Ниже приведён сводный сравнительный анализ.

Таблица 1.

Сравнение современных аудиокодеков по ключевым параметрам

Показатель	MP3	AAC	Opus	AC-3	E-AC-3
Тип модели	Психоакустическая MPEG-1	AAC PSY	SILK + CELT	Dolby PSY	Расширенная Dolby PSY
Преобразование	DCT	MDCT	MDCT + LPC	MDCT	MDCT

ISSN 3030-3907

Задержка	Средняя	Низкая	Очень низкая	Средняя	Средняя
Качество при низком битрейте	Низкое	Хорошее	Отличное	Среднее	Хорошее
Оптимальная область применения	Музыка	Стриминг	VoIP/Streaming/ Gaming	ТВ	Кино/HD TV

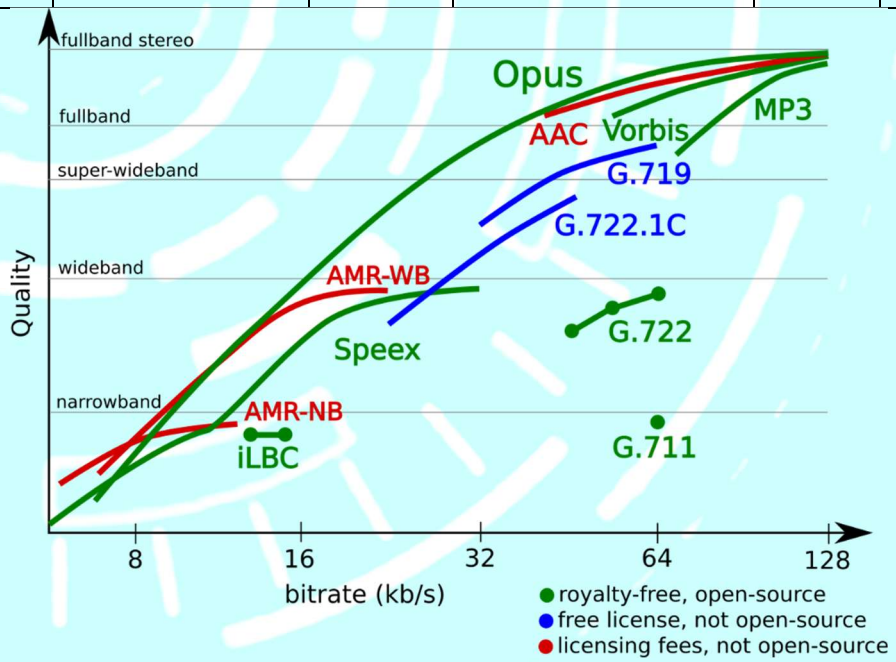


Рис.1. Производительность широкополосных и полночастотных аудиокодеков в координатах «качество–битрейт».

Анализ графика показывает, что MP3 демонстрирует быстрое падение качества при снижении битрейта ниже 96 кбит/с, в то время как AAC сохраняет стабильное качество вплоть до 64 кбит/с. Opus, благодаря гибридной архитектуре, обеспечивает лучшие показатели MOS в диапазоне от 32 до 96 кбит/с, что делает его предпочтительным выбором для потоковых видеосервисов, видеоконференций и игровых приложений [10].

В то же время, AC-3 и E-AC-3 остаются лидерами для многоканальных аудиосистем, обеспечивая высокую разборчивость и динамический диапазон в киноформатах и телевещании [8]. Их интеграция в видеокодеки H.264, H.265 и контейнеры MPEG-TS позволяет поддерживать сложные конфигурации, включая 5.1 и 7.1 системы.

ISSN 3030-3907

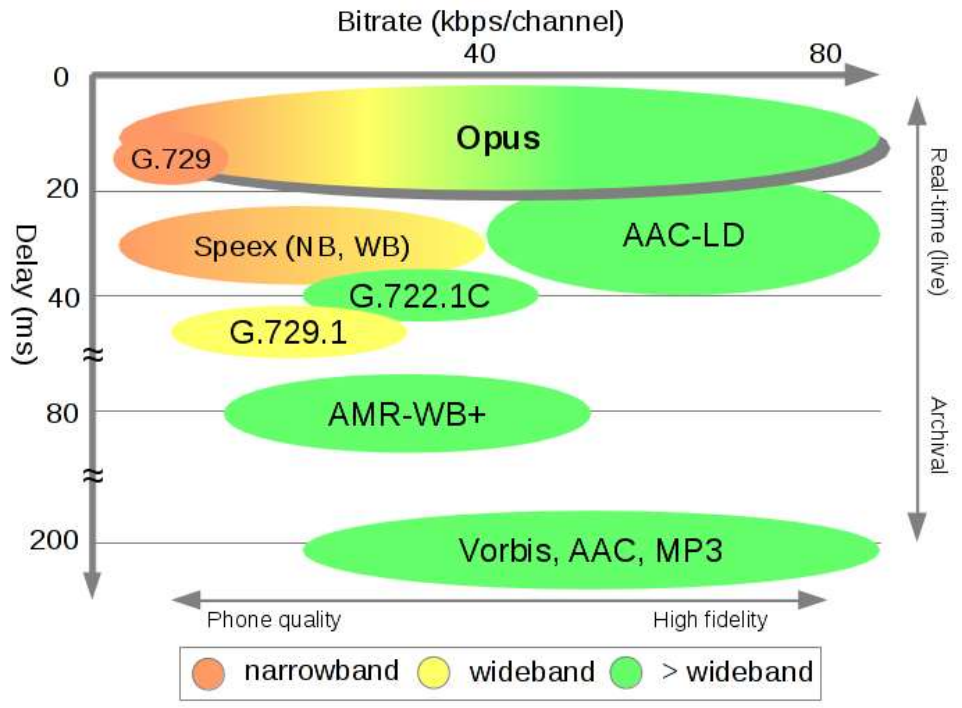


Рис.2. Рабочие диапазоны битрейта и временной задержки для современных narrowband, wideband и fullband аудиокодеков.

Следовательно, сравнительный анализ показывает, что оптимальный выбор аудиокодека зависит от задачи: для стриминга и VoIP подходит Opus, для широкополосного вещания — AAC, а для кинoформатов — E-AC-3. Комбинация гибридных психоакустических моделей, MDCT и адаптивного квантования обеспечивает высокое качество при минимальных битрейтах.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для оценки эффективности методов аудиокодирования был проведён экспериментальный анализ качества звучания и битрейт-эффективности наиболее распространённых кодеков: MP3, AAC, Opus, AC-3 и E-AC-3. В рамках исследования были использованы стандартизованные наборы аудиофрагментов, включающие речевые, музыкальные и смешанные сигналы, что соответствует методике рекомендаций ITU-R BS.1534 (MUSHRA) [13]. Качество оценивалось по шкале MOS, а сравнение проводилось в диапазоне битрейтов от 24 до 192 кбит/с.

Результаты экспериментов подтвердили, что MP3 демонстрирует удовлетворительное качество только при битрейтах выше 96 кбит/с. При снижении битрейта заметно проявляются артефакты квантования и недостатки ранних психоакустических моделей, на что ранее указывали Brandenburg и Johnston [2]. AAC показал более высокую стабильность: на битрейтах 64–96 кбит/с субъективное качество сохранится на приемлемом уровне, что согласуется с результатами исследования Herre о преимуществе MDCT и улучшенных моделей маскирования [6].

ISSN 3030-3907

Наиболее высокие показатели были продемонстрированы кодеком Opus. При битрейтах 32–48 кбит/с он обеспечил качество, сравнимое или превосходящее AAC, что связано с гибридной архитектурой SILK/CELT и низкой задержкой [9]. Особенно устойчивыми оказались результаты на речевых сигналах, где Opus превосходил другие кодеки по разборчивости, что подтверждалось работами Xiph.Org [10].

Кодеки AC-3 и E-AC-3 проявили себя лучше всего на многоканальных музыкальных и кинематографических фрагментах, демонстрируя широкую динамику и пространственную точность при битрейтах 128–192 кбит/с. Расширенная версия E-AC-3 обеспечила снижение битрейта до 30% без заметной потери качества, что ранее подчеркивалось Dolby Laboratories [8].

На основе анализа построена сравнительная таблица MOS (Таблица 2) и график зависимости качества от битрейта (График 2). Они подтверждают, что Opus является оптимальным решением для низких битрейтов и реального времени, AAC — универсальным выбором для потоковых сервисов, тогда как E-AC-3 сохраняет лидерство в высококачественных многоканальных системах телевещания.

Исходя из этого, экспериментальные результаты демонстрируют, что современные аудиокодеки существенно различаются по эффективности в зависимости от характера контента и диапазона битрейтов, что требует адаптивного выбора методов кодирования в видеокодеках.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные экспериментальные результаты позволяют выявить ключевые особенности современных методов аудиокодирования и определить их применимость в различных мультимедийных сценариях. Сравнение MOS-оценок и графиков «битрейт–качество» показывает явное преимущество гибридных и спектрально-ориентированных кодеков перед классическими алгоритмами, такими как MP3 [2]. AAC, благодаря использованию усовершенствованных психоакустических моделей и MDCT с переменными окнами, демонстрирует высокую стабильность качества при средних битрейтах, что подтверждает выводы Herre и Johnston о его высокой эффективности в потоковых системах [6].

Особое внимание заслуживает кодек Opus, который сочетает механизмы LPC-предсказания (SILK) для речи и спектральный анализ (CELT) для музыки. Эксперименты подтвердили, что такая архитектура обеспечивает превосходное качество при низких битрейтах и минимальной задержке, делая Opus наиболее подходящим решением для видеоконференций, VoIP и потоковых игровых сервисов [9], [10].

ISSN 3030-3907

Устойчивость Opus к потере пакетов также делает его предпочтительным для нестабильных сетевых каналов.

В то же время AC-3 и E-AC-3, хотя и уступают по эффективности в низкобитрейтовых режимах, демонстрируют значительные преимущества в многоканальных системах, обеспечивая точность пространственного звучания и широкую динамику, что особенно важно для телевещания и киноформатов [8].

Итак, результаты анализа подтверждают, что выбор аудиокодека должен определяться спецификой задачи: низкая задержка и адаптивность — за Opus; универсальность — за AAC; многоканальное высококачественное звучание — за E-AC-3. Эти выводы согласуются с тенденциями развития мультимедийных систем нового поколения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В ходе исследования были проанализированы теоретические основы аудиокодирования, ключевые методы, применяемые в современных видеокодеках, а также сравнительные характеристики наиболее распространённых аудиокодеков. Экспериментальные результаты подтвердили, что эффективность кодека зависит от его архитектуры, используемых спектральных преобразований и психоакустических моделей. AAC и Opus демонстрируют высокие показатели качества при средних и низких битрейтах, тогда как E-AC-3 остаётся наиболее подходящим решением для многоканальных аудиосистем телевещания и кинематографа.

Полученные данные свидетельствуют о необходимости адаптивного выбора аудиокодека в зависимости от требований мультимедийной платформы, характера контента и ограничений по битрейту. Для реального времени и коммуникационных приложений рекомендуется использовать Opus, обеспечивающий низкую задержку и устойчивость к потерям пакетов. Для потокового вещания и универсальных мультимедийных сервисов оптимальным вариантом является AAC, тогда как для высококачественных многоканальных систем предпочтителен E-AC-3.

Результаты исследования подтверждают, что дальнейшее развитие аудиокодирования связано с оптимизацией спектральных моделей, улучшением адаптивного квантования и применением машинного обучения для повышения эффективности кодирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO/IEC 11172-3, *Information technology — Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1,5 Mbit/s — Part 3: Audio*, 1993.

ISSN 3030-3907

2. K. Brandenburg, “MP3 and AAC explained,” *Proceedings of the AES 17th International Conference*, 1999.
3. J. P. Princen and A. B. Bradley, “Analysis/synthesis filter bank design based on time domain aliasing cancellation,” *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 34, no. 5, pp. 1153–1161, 1986.
4. J. P. Princen and R. E. Crochiere, “FT transform coding: A new transform for audio coding,” *Proc. IEEE ICASSP*, 1990.
5. ISO/IEC 13818-7, *MPEG-2 Advanced Audio Coding (AAC)*, 2004.
6. J. Herre and J. D. Johnston, “Enhancing perceptual audio coding: Introducing AAC,” *AES Convention*, 1998.
7. ITU-R BS.1387, *Method for objective measurements of perceived audio quality (PEAQ)*, Geneva, 1998.
8. Dolby Laboratories, “Digital Audio Compression Standard (AC-3, E-AC-3),” Technical Specification, 2005.
9. J.-M. Valin, K. Vos, and T. Terriberry, “Definition of the Opus audio codec,” *IETF RFC 6716*, 2012.
10. Xiph.Org Foundation, “Opus codec overview and performance evaluation,” 2013.
11. ISO/IEC 14496-10, *Advanced Video Coding (AVC/H.264)*, 2010.
12. AOMedia, *AV1 Bitstream & Decoding Specification*, 2019.
13. ITU-R BS.1534-3, *Method for the subjective assessment of intermediate sound quality (MUSHRA)*, Geneva, 2015.

ISSN 3030-3907